

2次元及び3次元空間におけるイオン音波ソリトンの研究

著者	長澤 武
号	1055
発行年	1988
URL	http://hdl.handle.net/10097/11988

氏 名	長 澤 武
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年3月15日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和52年3月 宇都宮大学大学院工学研究科電気工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	2次元及び3次元空間におけるイオン音波ソリトンの 研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 佐藤 徳芳 東北大学教授 安達 三郎 東北大学教授 澤多 康次 東北大学教授 渡辺 博茂

論 文 内 容 要 旨

本論文は、プラズマ中で大振幅のイオン波ソリトンを励起し、その相互作用の実験的研究結果を報告する。従来、平面状ソリトンについて得られた実験結果は理論値と良く一致している。また、2つの平面状ソリトンの正面衝突において、お互いに他のソリトンを通り抜け、衝突点での振幅は2つの波を重ね合わせた値より小さく、位相のずれを生じることが示されている。本実験では、円筒及び球状ソリトンが中心方向へ伝搬して圧縮されたとき、大振幅のソリトンが生成され、その直後に多くのソリトン状パルスに分裂する現象が見出された。この現象を明確にするために、2つの平面状ソリトンが斜めに衝突したときに生じる共鳴的相互作用を実験的に調べた。この結果、共鳴現象に関する理論的な解釈と良く一致することが分かった。以下その大要を述べる。

第1章 緒論；ソリトンの研究の意義及び歴史を述べる。

第2章 円筒状イオン音波ソリトン

§2-1 緒言；円筒状ソリトンの性質及び円筒中心で生じるソリトンの分裂現象の実験結果を述べる。

§2-2 理論的背景；実験的検証をするために、円筒及び球状ソリトンの特性についての理論的

背景を述べる。

§ 2-3 実験装置及び測定法；大振幅イオン波ソリトンを励起できる円筒形2重プラズマ(D-P)装置を用いた。プラズマはフィラメントと真空容器間の直流放電で生成される。使用気体は、Arである。波は2つのチェンバー間にパルス電圧を印加して、一方のチェンバーから他方のチェンバーへイオンを注入してイオン音波を励起する。波の特性は静電探針からの情報をオシロスコープ等で測定することによって得られる。

§ 2-4 実験結果；円筒状ソリトンについて、(1)円筒状収束形ソリトンは平面ソリトンに類似している。(2)ソリトンの速度(v)は $v \propto r^{-0.4}$ と表され(r は円筒の半径)、円筒中心で衝突した後、速度を増加して伝搬する。(3)速度振幅($\delta n/n$)依存性は $v = C_s(1 + \sigma \delta n/n)$ 、 $\sigma = 0.74$ であり、平面状($\sigma = 1/3$)より依存性が強い。(4)円筒状ソリトンの幅(D)と振幅の関係は $(D/\lambda_D)^2 \delta n/n = \gamma = 15.5$ であり、平面状($\gamma = 6$)より広い。(5)振幅の r 依存性は $\delta n/n \propto r^{-1}$ 、衝突前 $q = 0.5 \sim 0.6$ 衝突後 $q = 1.0$ なる。(6)初期振幅の大きさによってはプラズマ中心で振幅が90%以上にもなる。(7)衝突時の振幅が50%以上になると、衝突後多くのソリトン状パルスに分裂する。(8)衝突前後で位相がずれる。なお、衝突前の特性は理論値と良く一致するが衝突後は一致しない。などの現象が判明した。

§ 2-5 討論；(1)プラズマ中心で生じる現象：プラズマ中心でのソリトンは大振幅になるために、 $m = v/C_s > 1.59$ (単一ソリトン)となり、弱い散逸効果がある場合に相当し、ソリトンの散乱が生じる。(2)多ソリトン解：衝突後のソリトンの個数の増加はK-dV方程式から得られる多ソリトン解からは説明できない。(3)円筒状ソリトンについて共鳴条件の導出を試みる。：衝突前後の運動量保存及びエネルギー保存より $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ 、 $k_3 = k_1 + k_2$ が得られる。この関係は実験的に良く満たされている。(4)イオンのエネルギー分布関数について：ソリトンの全面に加速されたイオンが確認され、sakanakaが得た現象と定性的な一致をみた。(5)ソリトンの速度の動径方向依存性：ソリトンの前面に存在するブリカーサーを考慮することによって実験値は理論値と良く一致する。(6)定常状態のプラズマ中にイオンビームを注入した場合の小振幅イオン音波の分散関係：ソリトンはイオン音波の速進波の分岐に従う。などの点を示した。

§ 2-6 結言；この節は第2章の結言である。

第3章 球状イオン音波ソリトン

§ 3-1 緒言；第3章では球状ソリトンの特性を実験的に調べ理論値との比較、検討を行う。

§ 3-2 実験装置及び測定法；メッシュで作られた球をチェンバーの中に設置し、球の内側と外側にそれぞれプラズマを生成する。波の励起および測定法は第2章§ 2-3と同様である。

§ 3-3 実験結果；衝突前のソリトンの特性について、(1)プラズマ中心ではソリトンの波形が平面状ソリトンに類似している。(2)ソリトンのエネルギーは後方の残渣イオン波パルスに奪われることが確認された。(3)速度の r 依存性： $v \propto r^{-p}$ 、 $p = 0.54$ ($r > 2.75$)、(4)ソリトンの速度と振幅との関係： $v/C_s = 1 + \sigma \delta n/n$ 、 $\sigma = 0.34$ 、(5) $(D/\lambda_D)^2 \delta n/n = \gamma$ 、 $\gamma = 20$ であり、 σ の値はK-dV方程式の理論値と良く一致するが、 γ の値は理論値($\gamma = 6$)よ

り大きいことが見出された。(6) 振幅の r 依存性: $\delta n/n \propto r^{-q}$, $q=0.9 \sim 1.0$, についての実験結果はよく理論値と一致するが, 衝突後の振幅と幅の関係, 振幅の空間的変化は理論値と一致しない。(7) ソリトンは中心で衝突するとともに通り抜ける。などの現象が判明した。

§ 3-4 討論; (1) 球状ソリトンの振幅及びソリトンの後方に存在する“すそ”の部分: ソリトンのエネルギー保存則とソリトンの特性からソリトンの振幅は $\delta n/n \propto r^{-q}$, $q=4/3$ となる。実験値は $q=0.9 \sim 1.0$ であり, q の値が小さい。このことはソリトンが“すそ”の部分へエネルギーを供給するためと推定される。(2) ソリトンの後方に生じる“くぼみ”のげんい: ビームの加速電圧と共にビームの速進波と遅進波は中心方向へ伝搬し, ビーム密度が増大するために, それらの波は速度差を生じる。このことから2つの波の打ち消し合っている部分が現象し, それぞれの振幅が増大した様になる。(3) ソリトンの空間的変化: ソリトンのイオン密度の連続の式とソリトン速度の r 依存性の関係式から $v \propto r^{-p}$, $p=2/3$ となる。実験値は衝突前の $r > 2.75$ で $p=0.54$ であり, ほぼ一致しているであろう。(4) 球状ソリトンの幅: 幅が平面状ソリトンより広いことの原因は次の様に考えられる。球状グリッドの不均一性(静電探針の挿入用の孔; 直径10mmが密度の不均一性を生じる)が幅に影響を与える。これは波形の幅 ($D \simeq 10 \lambda_D \simeq 6 \text{ mm}$) から推定できる。などの点を示した。

§ 3-5 結言; この節は第3章の結言である。

第4章 平面状イオン音波ソリトンの共鳴現象

§ 4-1 緒言; ある入射角度で2つの平面状ソリトンが衝突したときに生じる共鳴現象の実験結果を述べる。

§ 4-2 理論的背景; 2つの平面状ソリトンが入射角 Ψ で衝突したときに生じる波の振幅 (h_3) は, 定性的には非線形効果と相互作用時間の積によると考えられる。従って

$$h_3 = I \phi_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial X} \cdot \tau I = h_1 \frac{1}{\sin^2(\Psi/2)} \quad (4-1)$$

となる。この式から入射角が小さいと, 強い相互作用を生じて大振幅のソリトンが生成される。この強い相互作用を生じさせる物理量は, 次の様に考えられる。2つのソリトン $\{(K_1, \Omega_1), (K_2, \Omega_2)\}$ の位相を $K_1 \cdot r - \Omega_1 t = C_1$, $K_2 \cdot r - \Omega_2 t = C_2$ とすると, 2つの波の交差点の速度は,

$$v_y = \frac{\Omega_1 + \Omega_2}{K_{1y} + K_{2y}}, \quad (\text{ただし, } K_{1x} = -K_{2x}) \quad (4-2)$$

となる。

一方, 2つの波が衝突して生じたソリトン (K_3, Ω_3) が次式

$$K_1 + K_2 = K_3, \quad \Omega_1 + \Omega_2 = \Omega_3 \quad (4-3)$$

を満たすと、(4-3)式から v_y は、

$$v_{3y} = v_y = \frac{\Omega_1 + \Omega_2}{K_{1y} + K_{2y}} \quad (4-4)$$

となり、(4-2)式に一致する。従って、2つのソリトンの交点での速度が相互作用で生じたソリトンの速度に一致するとき、新たに生じた波(K_3, Ω_3)を仲介にして2つのソリトン(K_1, Ω_1), (K_2, Ω_2)の運動量の交換が効率よく行われるので、(K_3, Ω_3)の振幅が増大すると考えられる。以上のことが成立するための(4-3)式を共鳴条件という。

§4-3 実験装置及び測定法；実験装置は前章で述べた変形D-P装置であり、平面グリッドによってプラズマは2つに分けられている。波の励起法や測定法は前章で述べたのと同様である。実験は2つの波が平面波である領域で行う。

§4-4 実験結果；(1)2つのソリトンの共鳴現象で生じる波の振幅の非共鳴時のそれと比較すると、短時間に成長し、初期ソリトンの約4倍まで成長することが見出された。また、衝突前後で波面の空間的な位相は正（衝突波面が進む）にずれる。なお、そのずれは時間とともに大きくなり、新しい波の存在がより明確に示された。(2)相互作用で生じる新しい波の振幅は入射角の関数として表せ、共鳴条件から得られる理論値に良く一致した。(3)各々の入射波に対する共鳴角は初期振幅のほぼ $1/2$ 乗となり、理論値と良く一致した。(4)入射角を固定して、初期ソリトンの振幅の共鳴現象が生じる初期振幅よりはるかに大きくすると、波面の位相のずれが負になる現象が見出された。(5)初期振幅を固定して、共鳴角より入射角を小さくすると強い相互作用を示し、衝突点近傍には台形構造が形成される。また、この台形構造は時間的に成長する非定常解であることが見出された。以上のことが実験的に判明した。

§4-5 討論；1)共鳴状態で生じた新しいソリトンの振幅増大率と共鳴角の関係：振幅増大率は $\varepsilon = h_3/h_1 = 2(1 + \cos \Psi_R)$ となり、共鳴角(Ψ_R)が小さいとほぼ4倍になる。(2)線形波の相互作用と非線形波の相互作用の相違点：線形分散式は $k_1 + k_2 = k_3$, $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ を満たさないが非線形分散式は $K_1 + K_2 = K_3$, $\Omega_1 + \Omega_2 = \Omega_3$ を満たし、共鳴現象を生じる。(3)線形波の相互作用で生じる波の振幅の非線形波の相互作用で生じる波の振幅の大きさの違い：2つの波の相互作用においてエネルギーと運動量保存の法則から、2つの波が線形波の場合、 $\varepsilon = 2\{\cos^2(\Psi/2)\}D_1/D_3$ となり、ほぼ2倍である。非線形波の場合、 $\varepsilon = 4\cos^4(\Psi/2)$ となり、 Ψ が小さいと約4倍になる。(4) ε と Ψ の関係で生じた理論値と実験値のずれの原因：2つの波の振幅が異なる場合($K_2 = \ell K_1$)、 $\cos \Psi_R = 3 - h_1(1 + \ell)^2 / \{3 + 2h_1(1 + \ell)^2\}$ となり、共鳴角にずれが生じる。などの点を示した。

§4-6 結言；この節は第4章の結言である。

第5章 結論；第2章の円筒乗ソリトン、第3章の球乗ソリトンの特性及びそれぞれの中心における衝突現象で生じる大振幅波についての実験的研究結果及び第4章の共鳴的相互作用を実験的に見出したことを述べる。

審 査 結 果 の 要 旨

分散性媒質中を伝搬する非線形波動の一つであるソリトン（孤立波）は、プラズマの加熱・輸送現象を解明する上で重要であるばかりでなく、非線形電気・電子回路、光ファイバ、神経系などにおけるパルス伝搬に関連しても多くの興味をもたれている。プラズマ中のイオン音波ソリトンは1966年鷺見・谷内によって理論的にその存在が予測され、1970年池地等の実験で確認された。その後の多くの研究によってイオン音波ソリトンの性質が解明されてきているが、著者は2次元及び3次元プラズマ空間におけるイオン音波ソリトンの実験的研究を行い、その特色を明らかにしてきた。本論文は、その研究成果をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒論であり、歴史的背景とともに、本研究の意義と目的を述べている。

第2章では、円筒状イオン音波ソリトンの実験が述べられている。実験には円筒状グリッドを有するダブルプラズマ装置が用いられ、封入気体はアルゴン $[(1.5-5.0) \times 10^{-4} \text{ Torr}]$ 、電子温度は数 eV、プラズマ密度は $(5-10) \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ である。グリッドの位置で励起されたソリトンは円筒中心軸に向かって伝搬し収束するが、その振幅は次第に増加する。しかし、中心軸近傍で、大振幅となったソリトンが多くのソリトン状パルスに分裂し、その後の伝搬が理論値と大きく異なることが見いだされた。これらは興味ある観測である。

第3章では、3次元効果を調べるために、プラズマ中に球状グリッドを置き球状ソリトンを励起している。その伝搬への球構造効果は理論とほぼ一致し、幾何学的構造を除けば、球状ソリトンの性質はほとんどの点で円筒状ソリトンと同じであることが示されている。

第4章においては、前述の円筒状および球状イオン音波ソリトン伝搬の中心位置近辺の振舞いを単純化することをも考え、2つの平面状イオン音波ソリトンが有限の交差角をなして衝突する場合を取り扱っている。衝突時の現象を観測した結果、交差角に依存する共鳴的相互作用により新しいソリトンが発生し、衝突時の振幅が初期振幅の4倍にまでなると同時に、衝突箇所には振幅の台形構造が形成されることを見いだしている。また、衝突時に位相ずれが現れることも示している。これらは注目すべき成果であり、理論的予測を検証するものである。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、2次元及び3次元イオン音波ソリトンの特色を明らかにするとともに、2つの平面状イオン音波ソリトンの衝突時における共鳴現象を検証するなど、ソリトンの基礎的性質を解明したもので、プラズマ理工学、電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。